Iranian Food Science and Technology Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Research Article
Vol. 20, No. 4, Oct.-Nov. 2024, p. 485-498

Investigating the Qualitative Changes of Golden Delicious Apple Variety during Storage Using X-ray Imaging

B. Tahani[1], B. Beheshti[2*], M. Heidarisoltanabadi[3], E. Hekmatian[4]

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Biosystems Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: beheshti-b@srbiau.ac.ir)
3- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran
4- Associate Professor, Department of Oral and Maxillofacial Radiology Department, School of Dentistry, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran; Member of Dental Implants Research Center, School of Dentistry, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

Received: 11.03.2024 Revised: 22.06.2024 Accepted: 22.06.2024 Available Online: 22.06.2024	**How to cite this article:** Tahani, B., Beheshti, B., Heidarisoltanabadi, M., & Hekmatian, E. (2024). Investigating the qualitative changes of Golden Delicious apple variety during storage conditions using X-ray imaging. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *20*(4), 485-498. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ ifstrj.2024.87241.1318

Introduction

Isfahan province is considered to be one of the top ten producing provinces of apple orchards with an area of 17,274 hectares and a production of 120,000 tons of apple. Determining the quality parameters of agricultural products requires the use of various methods, which are different according to the nature and characteristics of each product. The two main categories for dividing these methods include analytical (objective) methods and sensory (intrinsic) methods. Both qualitative assessment methods can be used in destructive and non-destructive ways. Apple is one of the fruits that can be stored for a relatively long time. Physiological changes during the storage period are inevitable and cause change to some quality characteristics of the fruit, such as firmness, moisture content, density, pH, and soluble solids. Using the methods of determining and extracting the quality characteristics of fruit during storage and monitoring the changes created, provides a suitable criterion for selecting and preparing the necessary conditions for storage and storage at the disposal of users and producers. X-ray imaging technique is among the methods used and computed tomography, which is now well-known in evaluation of various agricultural commodities and food quality. X-rays are electromagnetic waves with a short wavelength (0.01 to 10 nm) and high energy (from 120 electron volts to 120 kilo electron volts) that can penetrate many materials.

Materials and Methods

In order to determine the relationship between the physicochemical properties and the CT number of Golden Delicious apples, 280 Golden Delicious apples were collected from an orchard located in Semirom city of Isfahan province and stored in a cold room at 0 and 4 ºC and a humidity of 85±5%. These apples were harvested and collected from several trees after the fruit ripened completely. The weight and volume of apples were randomly selected based on the apples on the trees. The samples of stored apples were examined in 4 stages and based on the duration of storage on zero (the beginning of storage), 45, 90 and 135 days.. These tests included non-destructive tests of CT scan imaging and destructive tests to extract the physicochemical properties of apples, including CT number, pH, firmness, moisture, density, and soluble solids. In order to prepare CT scan images of apple samples (non-destructive X-ray test), a GE Healthcare multi-slice CT scan machine model 5122080-12 with 80 kV and 10 mA was used in the CT scan center of Al-Zahra Hospital in Isfahan. Moisture content was determined by weighing the samples and recording their moisture changes before and after drying in the oven at 105 ºC s for 24 hours. Total soluble solids were measured by refractometer device and reported as Brix degree. In order to measure the density of fruits, the weight and volume

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2024.87241.1318

of each fruit was recorded. A digital pH meter was used to measure the pH of fruit. Penetrometer device was used to measure the firmness of apples. At the end, with the specified values, Pearson correlation coefficients between CT number and other physicochemical properties were determined. Also, by plotting the mentioned values, the most suitable regression equations with the highest coefficients of determination were obtained.

Results and Discussion

Based on the results, the average value of CT number, pH, firmness, moisture, density and total soluble solid of apple at two temperatures of zero and 4 ºC were -115.02 and -166.86, 3.85 and 3.86, 76 37.36 and 33.36 N, 0.82 and 0.80%, 0.76 and 0.72 g/cm^3 and 15.30 and 15.79% Brix, respectively. The results showed that the CT number has a negative linear correlation with pH and total soluble solid and a positive linear correlation with the properties of apple firmness, moisture and fruit density. Based on the results, at two storage temperatures of 0 and 4 ºC, the coefficients of determination (R^2) obtained from the linear regression model of CT number with pH levels of 0.75 and 0.55, apple firmness 0.32 and 0.57, moisture content 0.78 and 0.85, fruit density 0.82 and 0.84 and total soluble solid 0.85 and 0.62 were obtained.

Conclusion

These results shown that the non-destructive test of X-ray imaging can be used with a suitable approximation to determine some quality properties of apple products.

Keywords: Apple, CT number, Physicochemical properties, Storage, X-ray

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۳، ص. ۴۹۸-۴۸۵

بررسی تغییرات کیفی سیب رقم گلدن دلیشز در شرایط انبارداری با استفاده از تصویربرداری اشعه ایکس

بهشاد طحانی[1]- بابک بهشتی[2*]- محسن حیدری سلطان آبادی[3]- احسان حکمتیان[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

چکیده

سیب از جمله میوه‌هایی است که برای مدت زمان نسبتاً طولانی در شرایط انبارداری نگهداری می‌شود. تغییرات فیزیولوژیکی ایجاد شده در محصول، موجب تغییر در خصوصیات کیفی میوه می‌گردد. از این‌رو ارزیابی‌های کیفی و انتخاب شرایط مناسب برای نگهداری، ضروری به نظر می‌رسد. در تحقیق حاضر، سیب رقم گلدن دلیشز در دو دمای انبار صفر و ۴ درجه سلسیوس طی بازه‌های زمانی صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵روز انبار گردید و در پایان هر بازه، خصوصیات کیفی سیب شامل عدد سی‌تی، pH، سفتی، رطوبت، چگالی و مواد جامد محلول سیب اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج، مقدار متوسط عدد سی‌تی، pH، سفتی، رطوبت، چگالی و مواد جامد محلول سیب در دو دمای صفر و ۴ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۱۱۵/۰۲- و ۱۶۶/۸۶-، ۳/۸۵ و ۳/۸۶، ۳۷/۷۶ و ۳۳/۳۶ نیوتن، ۸۲ و ۸۰/۶۰ در صد، ۰/۷۶ و ۰/۷۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۱۵/۳۰ و ۱۵/۷۹ در صد بریکس به‌دست آمد. نتایج نشان داد که عدد سی‌تی با میزان pH و مواد جامد محلول، همبستگی خطی منفی و با خواص سفتی سیب، رطوبت و چگالی میوه همبستگی خطی مثبت دارد. بر این اساس در دو دمای انبارداری صفر و ۴ درجه سلسیوس، ضرایب تبیین (R^2) به‌دست آمده از مدل رگرسیون خطی، برای ارتباط عدد سی‌تی با میزان pH ۰/۷۵ و ۰/۵۵، سفتی سیب ۰/۳۲ و ۰/۵۷، رطوبت ۰/۷۸ و ۰/۸۵، چگالی میوه ۰/۸۲ و ۰/۸۴ و مواد جامد محلول ۰/۸۵ و ۰/۶۲ به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که با تقریب مناسبی می‌توان از آزمون غیر مخرب تصویربرداری اشعه ایکس در تعیین برخی خواص کیفی محصول سیب استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: اشعه ایکس، انبارداری، خواص فیزیکو شیمیایی، سیب، عدد سی‌تی

مقدمه

میوه سیب سهم قابل ملاحظه‌ای در بخش تجارت محصولات کشاورزی در ایران را به خود اختصاص می‌دهد. ایران به‌دلیل داشتن شرایط آب و هوایی مناسب برای کشت محصولات سردسیری، از جایگاه ممتازی برای تولید سیب درختی برخوردار است. سطح (بارور) زیر کشت باغ‌های سیب ایران، حدود ۲۳۷ هزار هکتار بوده که از این سطح حدود ۴ میلیون تن سیب تولید می‌شود و سهم ۱۵/۱ درصدی از کل میزان تولیدات محصولات باغی را به خود اختصاص داده است. استان‌های آذربایجان غربی با سهم ۲۹/۶ درصد، آذربایجان شرقی با سهم ۱۶/۷ درصد، تهران با سهم ۸/۰۷ درصد، فارس با سهم ۸/۰۶ درصد و همدان با سهم ۵/۹ درصد در رتبه‌های اول تا پنجم تولید کنندگان سیب کشور هستند. استان اصفهان با سطح زیر کشت باغات سیب در حدود ۱۷۲۷۴ هکتار و تولید ۱۲۰ هزار تن سیب درختی یکی از ده استان برتر تولیدکننده سیب محسوب می‌شود (Anon, 2023).

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: beheshti-b@srbiau.ac.ir)
۳- دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
۴- دانشیار گروه آموزشی رادیولوژی دهان، فک و صورت، دانشکده دندانپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، ایران؛ عضو مرکز تحقیقات ایمپلنت‌های دندانی، دانشکده دندانپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، ایران

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2024.87241.1318

ارقام سیب درختی تولیدی در استان اصفهان شامل رقم رد، گلدن، سیب گلاب و سایر ارقام جدید مانند فوجی و گالا است.

تعیین پارامترهای کیفی محصولات کشاورزی مستلزم استفاده از روش‌های متنوعی است، که با توجه به ماهیت و ویژگی‌های هر محصول متفاوت می‌باشد. دو دسته اصلی برای تقسیم‌بندی این روش‌ها شامل روش‌های تحلیلی (عینی) و روش‌های حسی (ذاتی) هستند. هر دو روش ارزیابی کیفی را می‌توان به‌صورت مخرب و غیر مخرب به کار برد. محصول سیب از جمله میوه‌هایی است که برای مدت زمان نسبتاً طولانی در شرایط انبارداری نگهداری می‌شود. تغییرات فیزیولوژیکی در طول دوره نگهداری، امری اجتناب‌ناپذیر بوده و موجب تغییر برخی از ویژگی‌های کیفی میوه نظیر سفتی، محتوای رطوبت، چگالی، pH و مواد جامد محلول می‌گردد (Azadshahraki & Kafashan, 2016). استفاده از روش‌های تعیین و استخراج خصوصیات کیفی میوه در حین انبارداری و رصد تغییرات ایجاد شده، معیار مناسبی را جهت انتخاب و مهیاسازی شرایط لازم برای انبارداری و ذخیره‌سازی در اختیار بهره‌برداران و تولیدکنندگان قرار می‌دهد. از جمله روش‌های مورد استفاده، تکنیک تصویربرداری پرتو ایکس و توموگرافی محاسباتی است که در حال حاضر در زمینه‌های مختلف کشاورزی و ارزیابی کیفیت مواد غذایی به شهرت رسیده‌اند. پرتوهای ایکس، امواج الکترومغناطیسی با طول موج کم (۰/۰۱ تا ۱۰ نانومتر) و انرژی بالا (از ۱۲۰ الکترون ولت تا ۱۲۰ کیلوالکترون ولت) هستند که می‌توانند به درون مواد متعددی نفوذ کنند. فوتون‌ها انرژی خود را در حین عبور از ماده از دست می‌دهند و این تضعیف به ایجاد تصویر انتقالی کمک می‌کند. مقدار تضعیف انرژی پرتو، علاوه بر ویژگی ماده، به شدت آن نیز وابستگی دارد. در حوزه توموگرافی محاسباتی، تضعیف پرتو ایکس توسط عدد سی‌تی (CT) بیان می‌شود. با بهبود مداوم در ابزارها و قدرت محاسباتی، انتظار می‌رود که این تکنیک در آینده در زمینه کشاورزی بیشتر قابل استفاده شود (Kotwaliwale *et al.*, 2014). تحقیقات متعددی در زمینه استفاده از تصویربرداری اشعه ایکس برای ارزیابی کیفی محصولات غذایی به ثبت رسیده است. در پژوهشی به‌طور موفقیت‌آمیز وابستگی مقدار سی‌تی به ترکیبات شیمیایی گوشت مشخص گردید همچنین روابط بین کلرید سدیم (نمک طعام) و مقدار سی‌تی مدل‌سازی گردید (Haseth *et al.*, 2007). در تحقیقی از توموگرافی اشعه ایکس (X-ray micro-CT) برای تجسم ساختارهای کریستالی یخ تشکیل شده در هنگام انجماد و حفره‌های ایجاد شده پس از خشک‌کردن تعدادی از مواد غذایی شامل گوشت، ماهی، مرغ، سیب‌زمینی، پنیر و هویج استفاده شد. نتایج مطالعه، توانایی تکنیک توموگرافی اشعه ایکس را برای توصیف ریزساختار کریستال یخ داخلی مواد منجمد نشان داد. کاربرد این روش می‌تواند در تجزیه و تحلیل غذاهای منجمد مفید باشد (Mousavi *et al.*, 2007). محققان دیگر از جذب اشعه ایکس به‌عنوان شاخصی برای تشخیص کیفیت انبه بر اساس ارتباط آن با چگالی، رطوبت، مواد جامد محلول، اسیدیته قابل تیتراسیون و pH استفاده کردند. آنها یک معادله رگرسیون بین عدد توموگرافی کامپیوتری (CT) و خواص فیزیکوشیمیایی میوه به‌دست آوردند. بر اساس نتایج، عدد سی‌تی انبه سالم همبستگی مثبت با چگالی، محتوای رطوبت و اسیدیته قابل تیتراسیون و همچنین همبستگی منفی با مواد جامد محلول و pH داشت. نتایج آنها نشان داد که اندازه‌گیری عدد سی‌تی میوه سالم می تواند به‌عنوان یک شاخص غیر مخرب در تعیین کیفیت انبه استفاده شود (Barcelon *et al.*, 1999). در تحقیقی از تصویربرداری سی‌تی اسکن به‌عنوان یک روش غیر مخرب برای تخمین برخی شاخص‌های کیفی میوه انار استفاده شد. رابطه مقادیر شاخص‌های کیفی و عدد سی‌تی که بیان‌گر مقدار جذب اشعه ایکس است در قالب مدل‌های رگرسیون خطی بررسی گردید. مطابق نتایج، همبستگی بین عدد سی‌تی و شاخص‌های کیفی در تمامی مدل‌ها بیش از ۰/۹ به‌دست آمد. عدد سی‌تی همبستگی مثبتی با اسیدیته قابل تیتراسیون و همبستگی منفی با میزان آنتوسیانین‌ها، pH و مواد جامد محلول نشان داد (Salmanizade *et al.*, 2013). در مطالعه‌ای با استفاده از تصاویر توموگرافی کامپیوتری با اشعه ایکس به ترسیم تخلخل سیب فوجی و کمک به تعیین میزان تأثیر ویژگی‌های مختلف مورفولوژیکی و ریزساختاری میوه بر حساسیت به قهوه‌ای شدن داخلی ناشی از تنش CO_2 پرداخته شد (Chigwaya *et al.*, 2021). محققان یک روش غیر مخرب برای تشخیص خودکار و تعیین کمیت حجم کوفتگی میوه سیب با استفاده از تصاویر اشعه ایکس اجرا کردند. مقایسه بین تخمین‌های حجم کوفتگی مبتنی بر تصاویر اشعه ایکس و اندازه‌گیری‌های مخرب نشان داد که کوفتگی‌های ناشی از ضربه جسم کروی، می‌توانند به‌طور بسیار نامنظمی شکل گیرند و برآورد حجم کوفتگی بر اساس فرضیات هندسی ساده نمی‌توانند نتایج دقیقی ارائه دهند (Diels *et al.*, 2017). در تحقیقی یک روش تصویربرداری غیر مخرب با استفاده از اشعه ایکس برای تجسم، توصیف و تعیین کمیت ریزساختار سه بعدی و توزیع اندازه کریستال یخ در بافت سیب در طول دوره انجماد با سه نرخ سردسازی تند، متوسط و کند ارائه شد. تجزیه و تحلیل کمی نشان داد که کریستال‌های بزرگ‌تر یخ منجر به آسیب بیشتر به ساختار بافت می‌شوند و متعاقباً اثرات نامطلوبی بر کیفیت میوه ایجاد می‌کنند (Vicent *et al.*, 2017). در پژوهشی با استفاده از تصاویر اشعه ایکس به بررسی و تشخیص لکه‌های ایجاد شده بر روی سیب‌های مناطق مختلف در روزهای ۰، ۷، ۱۴، ۲۱، ۳۵ و ۶۳ پس از برداشت پرداخته شد. نتایج نشان داد که سرعت پیشرفت لکه‌ها در نمونه‌های جمع‌آوری‌شده از مناطق مختلف متفاوت بود و بیشترین مقدار

توزیع لکه‌ها در قسمت کاسبرگ سیب بود (Jarolmasjed *et al.*, 2016).

در برخی از تحقیقات دیگر نیز اثرات عوامل مختلف بر تغییرات عدد سی‌تی محصول مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان مثال در مطالعه‌ای اثر زمان رسیدگی بر تغییرات عدد سی‌تی و خواص فیزیکوشیمیایی میوه هلو بررسی شد. طبق نتایج، عدد سی‌تی هلو پس از دو هفته رسیدگی به‌طور قابل‌توجهی از مقدار اولیه ۲۴/۸ به ۴۵/۵- کاهش یافت. عدد سی‌تی منفی احتمالاً می‌تواند ناشی از وجود فضای خالی، محتوای رطوبت کمتر و بافت میوه با چگالی کمتر در اثر گذر زمان رسیدگی باشد. واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی در زمان‌های مختلف رسیدن ممکن است با سرعت‌های متفاوتی تغییر کند که درنتیجه تغییرات عدد سی‌تی برای میوه متفاوت است. باگذشت زمان رسیدگی میوه، محتوای رطوبت و چگالی از روند کاهشی مشابه با عدد سی‌تی پیروی کرد (Barcelon *et al.*, 1999). در مطالعه‌ای فرآیند خشک‌کردن سیب با استفاده از تصویربرداری اشعه ایکس و محاسبه عدد سی‌تی انجام شد. نتایج آزمایش‌ها وجود همبستگی رطوبت میوه سیب با مقدار عدد سی‌تی (R^2= ۰/۶۴) نشان داد (Jingping *et al.*, 2003).

تحقیق حاضر با هدف تعیین روابط بین عدد سی‌تی حاصل از تصویربرداری با اشعه ایکس و خواص فیزیکوشیمیایی سیب رقم گلدن دلیشز طی شرایط انبارداری انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور تعیین روابط بین خواص فیزیکوشیمیایی و عدد سی‌تی سیب رقم گلدن دلیشز، تعداد ۲۸۰ عدد سیب رقم گلدن دلیشز از باغی واقع در شهرستان سمیرم اصفهان تهیه و در شرایط دمایی ۴ و صفر درجه سلسیوس و رطوبت ۵±۸۵ درصد در سردخانه انبار گردید. این سیب‌ها پس از رسیدگی کامل میوه و از چند درخت، برداشت و جمع‌آوری گردید. وزن و حجم سیب‌ها به‌صورت تصادفی و بر اساس سیب‌های موجود بر روی درخت‌ها انتخاب شد. نمونه سیب‌های انبار شده، در ۴ مرحله و براساس مدت زمان انبارداری به‌ترتیب در روزهای صفر (آغاز انبارداری)، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ روز برداشت و آزمایش‌های مورد نظر روی نمونه‌ها انجام گردید. این آزمایش‌ها شامل آزمون غیرمخرب تصاویربرداری سی‌تی اسکن و آزمون‌های مخرب استخراج خواص فیزیکوشیمیایی سیب شامل عدد سی‌تی، pH، سفتی یا مقاومت به نفوذ، رطوبت، چگالی یا جرم حجمی و مواد جامد محلول بودند. به‌منظور تهیه تصاویر سی‌تی اسکن از نمونه‌های سیب (آزمون غیر مخرب X-ray) از دستگاه سی‌تی اسکن مولتی اسلایس GE Healthcare مدل 5122080-12 با ولتاژ ۸۰ کیلوولت و جریان ۱۰ میلی‌آمپر در مرکز سی تی اسکن بیمارستان الزهرای اصفهان استفاده شد (شکل ۱). به این منظور نمونه‌های سیب در داخل دستگاه قرار گرفته و عملیات تصویربرداری با اشعه ایکس انجام و تصاویر در حافظه دستگاه ذخیره گردید. تعداد نمونه‌های سیب در هر آزمایش ۳۵ عدد انتخاب شد. این تعداد علاوه بر پر کردن کامل سکوی دستگاه سی‌تی اسکن (قسمت قرارگیری بیمار)، موجب افزایش دقت آزمایش‌می‌شد. در قدم بعدی، تصاویر در محیط نرم‌افزار OnDemand فراخوانی شدند. سپس با توجه به آناتومی و سطوح حرکتی، ۳ نما از هر تصویر شامل (سطح) Sagittal، Coronal و Axial استخراج گردید. در ادامه، هیستوگرام اعداد سی‌تی رسم گردید (شکل ۱). در هیستوگرام رسم شده از هر نمونه، با انتخاب ۳۰ نقطه و قرائت اعداد سی‌تی، میانگین آنها به‌عنوان عدد سی‌تی نمونه ثبت شد.

تعیین درصد رطوبت با استفاده از توزین نمونه‌ها و ثبت تغییرات رطوبت آنها قبل و بعد از خشک‌کردن در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۴ ساعت با استفاده از رابطه (۱) انجام گرفت (AOAC, 2005).

$$(m_1-m_2)/m_0\times100 \quad (۱)$$

که در آن m_0 وزن نمونه اولیه، m_1 وزن ظرف و نمونه قبل از خشک‌کردن و m_2 وزن ظرف و نمونه بعد از خشک‌کردن می‌باشد.





شکل ۱- تصویربرداری سیب با دستگاه سی‌تی‌اسکن

Fig. 1. Apple imaging with a CT scan machine

برای اندازه‌گیری pH، ۱۰ میلی‌لیتر از عصاره استخراج شده میوه، توسط کاغذ صافی صاف شده و به‌وسیله آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی لیتر رسانده شد. سپس با قرار دادن پروب دستگاه pH متر دیجیتالی داخل آن، pH اندازه‌گیری شد (AOAC, 1999). برای اندازه‌گیری سفتی سیب‌ها لایه نازکی از پوست در دو سمت مقابل هم کمی بالاتر از خط استوایی با قطر ۱ سانتی‌متر مربع جدا و سپس با استفاده از پنترومتر با قطر ۱۱ میلی‌متر مربع و فشار عمود به گوشت میوه، میزان سفتی بافت بر حسب نیوتن تعیین گردید (Azadshahraki & Kafashan, 2016). به‌منظور اندازه‌گیری چگالی میوه‌ها ابتدا وزن هر میوه با استفاده از یک ترازوی دقیق دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. سپس حجم هر میوه از طریق میزان جابجایی آب یک استوانه مدرج در حین غوطه‌ور شدن سیب در آن ثبت گردید. با تقسیم وزن هر میوه بر حجم آن، چگالی میوه به‌دست آمد. مواد جامد محلول توسط دستگاه رفرکتومتر دستی مدل آتاگو ۱۲، ساخت ژاپن اندازه‌گیری و برحسب درصد بریکس گزارش گرفته گردید (Anon, 2004). به این صورت که چند قطره از عصاره حاصل بر روی منشور دستگاه قرار داده شد و جلوی نور گرفته شد تا شکست نور و عدد حاصل از آن‌که معرف درصد املاح جامد محلول است، به‌دست آمد. در پایان با مشخص شدن مقادیر عدد سی‌تی، pH، سفتی، رطوبت، چگالی و مواد جامد محلول نمونه‌های سیب، ضرایب همبستگی پیرسون بین عدد سی‌تی و سایر خصوصیات فیزیکوشیمیایی تعیین گردید. همچنین با ترسیم مقادیر یاد شده، مناسب‌ترین معادلات رگرسیون با بیشترین مقدار ضریب تبیین به دست آمد.

نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری خواص فیزیکو شیمیایی سیب شامل عدد سی‌تی، میزان pH، سفتی سیب، رطوبت، چگالی و مواد جامد محلول طی نگهداری در دو دمای انبار صفر و ۴ درجه سلسیوس و طی ۱۳۵ روز انبارداری در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین در جدول ۲ میزان همبستگی (ضریب همبستگی پیرسون) خواص سیب طی انبارداری و در جدول ۳ خلاصه معادلات رگرسیون خطی و ضرایب تبیین (R^2) ارائه شده است. در ادامه به بررسی روند تغییرات خواص کیفی میوه سیب بر حسب عدد سی‌تی پرداخته می‌شود.

جدول ۱- مقادیر متوسط خواص سیب طی ۱۳۵ روز نگهداری در انبار
Table 1- Average values of apple properties during 135 days of storage

دمای انبارداری Storage temperature (°C)	خواص فیزیکوشیمیایی سیب Apple physicochemical property					
	عدد سی‌تی CT number	pH	سفتی سیب Flesh firmness (N)	رطوبت Moisture (%)	چگالی Density (gcm^{-3})	مواد جامد محلول Soluble solids (%brix)
0	-115.02	3.85	37.76	82	0.76	15.30
4	-166.86	3.86	33.36	80.60	0.72	15.79

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شده برای خواص فیزیکو شیمیایی سیب
Table 2- Pearson's correlation coefficient calculated for apple physicochemical property

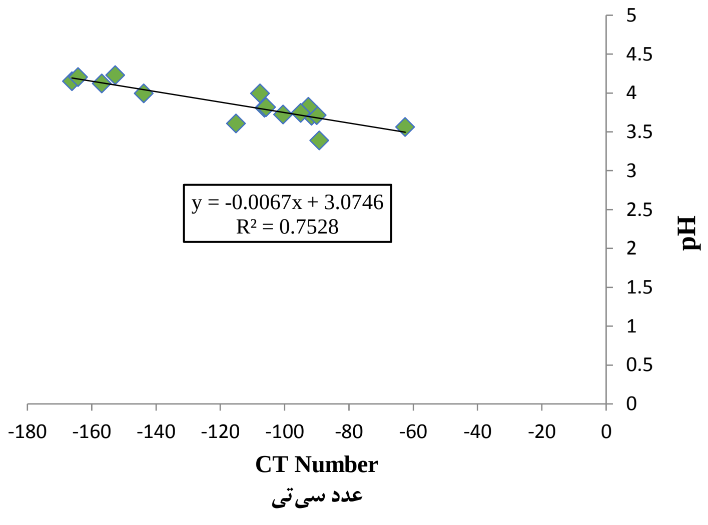
	عدد سی‌تی CT number	pH	سفتی سیب Flesh firmness	رطوبت Moisture	چگالی Density	مواد جامد محلول Soluble solids
عدد سی‌تی CT number	1	-0.688**	0.813**	0.928**	0.904**	-0.830**
pH		1	0.691**	-0.745**	-0.794**	0.869**
سفتی سیب Flesh firmness			1	0.853**	0.817**	-0.859**
رطوبت Moisture				1	0.945**	-0.888**
چگالی Density					1	-0.884**
مواد جامد محلول Soluble solids						1

n.s، * و** به‌ترتیب بدون اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.
n.s, * and ** respectively non-significant and significant difference at 1% and 5% probably level.

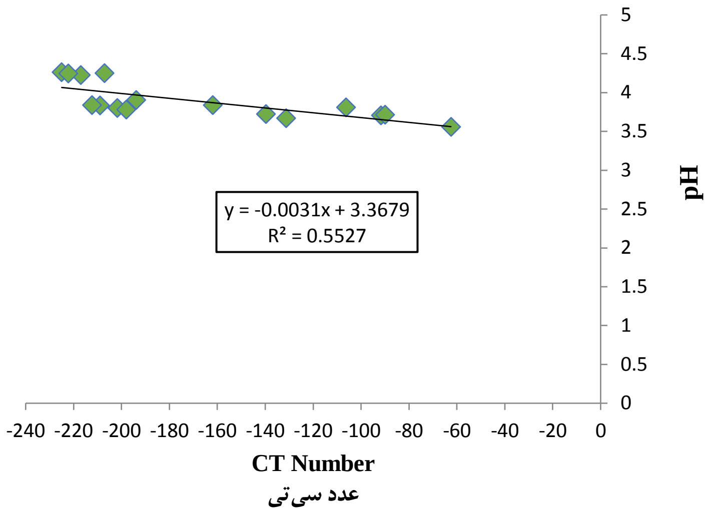
جدول ۳- مشخصات معادلات رگرسیون خطی در پیش‌بینی خصوصیات سیب برحسب عدد سی‌تی
Table 3- Specifications of linear regression equations in predicting apple characteristics according to CT number

خصوصیات سیب Apple characteristics	نوع معادله Equation type	دمای انبارداری Storage temperature (°C)	ضریب تبیین (R^2) Coefficient of determination	شکل معادله Equation form
pH	خطی	0	0.7528	y = -0.0067x + 3.0746
	Linear	4	0.5527	y = -0.0031x + 3.3679
سفتی سیب	خطی	0	0.3241	y = 0.0301x + 40.746
Flesh firmness	Linear	4	0.5748	y = 0.0812x + 46.437
رطوبت	خطی	0	0.786	y = 0.0004x + 0.8615
Moisture content	Linear	4	0.8515	y = 0.0004x + 0.8641
چگالی	خطی	0	0.8284	y = 0.0017x + 0.9668
Density	Linear	4	0.8488	y = 0.0012x + 0.9219
مواد جامد محلول	خطی	0	0.8563	y = -0.0144x + 13.697
Soluble solids	Linear	4	0.6267	y = -0.014x + 13.457

طبق نتایج جدول ۲ عدد سی‌تی با میزان pH رابطه خطی منفی با ضریب همبستگی ۰/۶۸۸- دارد که در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. بر اساس نتایج شکل ۲ و شکل ۳ میزان ضریب تبیین (R^2) در معادله رگرسیون خطی، در دمای صفر و ۴ درجه سلسیوس به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۵۵ به‌دست آمد. این موضوع نشان می‌دهد که در دمای انبارداری صفر درجه سلسیوس با دقت بالاتری از طریق عدد سی‌تی می‌توان تغییرات pH سیب را تخمین زد. در دمای ۴ درجه سلسیوس، افزایش پراکندگی تغییرات عدد سی‌تی به‌خصوص در مقادیر بالاتر، موجب کاهش دقت در پیش‌بینی pH شده است. در تحقیق مشابه بر روی ارتباط جذب اشعه ایکس و تشخیص کیفیت انبه نیز عدد سی‌تی همبستگی معکوس با pH میوه داشت (Barcelon *et al.*, 1999). نتایج پژوهشی نشان داد که در میوه انبه عدد سی‌تی به‌طور قابل‌توجهی با زمان رسیدگی کاهش یافت درحالی‌که pH با زمان رسیدگی افزایش نشان داد (Kotwaliwale *et al.*, 2012). به‌طور مشابه در میوه انار، عدد سی‌تی همبستگی منفی با میزان آنتوسیانین‌ها و pH محلول داشت (Salmanizade *et al.*, 2013).



شکل ۲- تغییرات مقدار pH برحسب عدد سی‌تی در دمای انبارداری صفر درجه سلسیوس
Fig. 2. Changes in pH value in terms of CT number at the storage temperature of 0 degrees Celsius



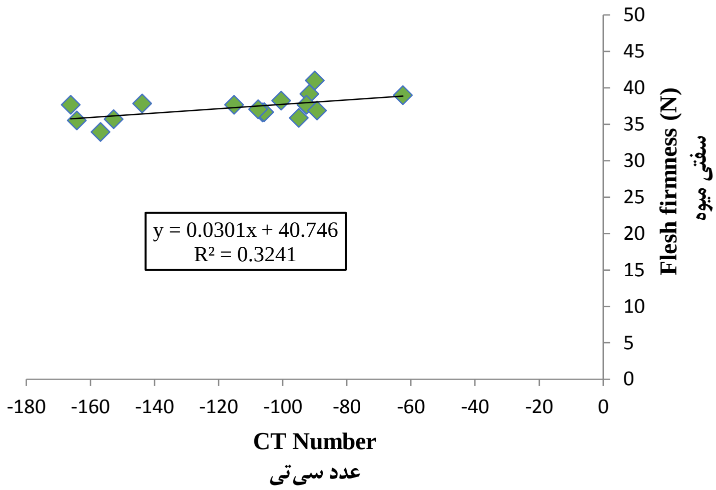
شکل ۳- تغییرات مقدار pH برحسب عدد سی‌تی در دمای انبارداری ٤ درجه سلسیوس

Fig. 3. Changes in pH value in terms of CT number at the storage temperature of 4 degrees Celsius

طبق نتایج جدول ۲ میزان عدد سی‌تی میوه سیب و خاصیت سفتی آن ارتباط مستقیم (خطی مثبت) معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد نشان می‌دهد. در این حالت ضریب همبستگی مقدار ۰/۸۱۳ به‌دست آمد. طبق نتایج مندرج در شکل ۴ و شکل ۵، پیش‌بینی مقادیر سفتی میوه سیب در فرآیند انبارداری در دو دمای صفر و ۴ درجه سلسیوس به ترتیب با ضرایب تبیین (R^2) ۰/۳۲ و ۰/۵۷ امکان‌پذیر است. در دمای نگهداری ۴ درجه سلسیوس با توجه به بیشتر بودن ضریب تبیین، پیش‌بینی مقادیر سفتی سیب با دقت بیشتری انجام می‌شود. باوجود رابطه مستقیم معنی‌دار بین تغییرات عدد سی‌تی و مقدار سفتی بافت سیب در فرآیند انبارداری، ضرایب تبیین چندان بزرگ نیستند و دقت پیش‌بینی سفتی از روی اعداد سی‌تی کم خواهد بود. به نظر می‌رسد در این حالت، داده‌ها دارای پراکندگی زیادی بوده‌اند یا یک رابطه غیرخطی بین این دو صفت برقرار بوده است، که باعث کاهش ضریب تبیین شده است. جمشیدی و همکاران (Jamshidi *et al.*, 2017) با استفاده از تصاویر نقطه‌ای دینامیکی به‌عنوان یک روش نوری نوین در ارزیابی غیر مخرب سفتی سیب پرداختند. در این تحقیق تصاویر نقطه‌ای دینامیکی از نمونه‌های سیب در دو طول موج ۶۸۰ و ۷۸۰ نانومتر به‌طور جداگانه و در طی دوره انبارداری در محیط نرم‌افزار MATLAB پردازش شد. توانایی این روش در پیش‌بینی سفتی میوه سیب با تدوین مدل‌های رگرسیون خطی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد روش مذکور قادر به پیش‌بینی غیر مخرب ویژگی‌های سفتی سیب شد. بهترین مدل واسنجی تدوین شده توانست ضریب همبستگی ۰/۸۱ در طول موج ۶۸۰ نانومتر و ضریب همبستگی ۰/۸۳ در طول موج ۷۸۰ نانومتر، ویژگی سفتی سیب را پیش‌بینی کند (Jamshidi *et al.*, 2017).

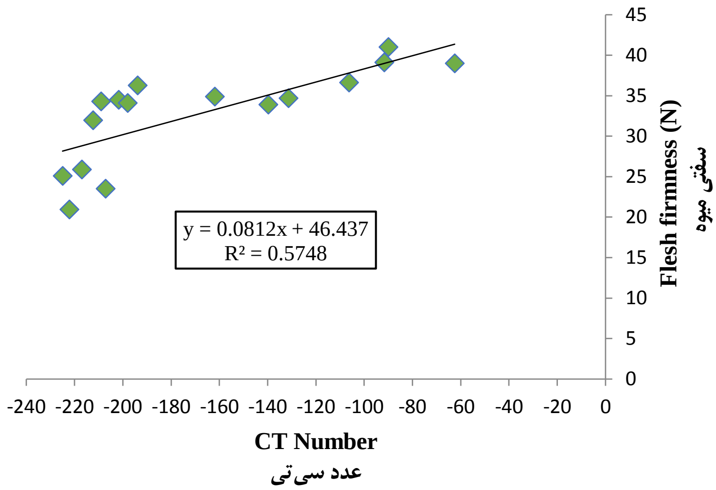
تغییرات عدد سی‌تی و رطوبت میوه سیب طی زمان انبارداری، رابطه مستقیم معنی‌دار در سطح یک درصد و با ضریب همبستگی ۰/۹۲۸ نشان داد (جدول ۲). طبق نتایج شکل ۶ و شکل ۷ و بر اساس معادله رگرسیون خطی، میزان رطوبت میوه در فرآیند انبارداری با ضرایب تبیین (R^2) به‌ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۸۵ برای دمای نگهداری صفر و ۴ درجه سلسیوس از طریق تغییرات اعداد سی‌تی قابل پیش‌بینی است.

نتایج مشابهی در میوه انبه گزارش‌شده است (Barcelon *et al.*, 1999, Kotwaliwale *et al.*, 2012). همچنین نتایج تحقیق وجود همبستگی رطوبت با مقدار عدد سی‌تی را در میوه سیب (R^2= ۰/۶۴) نشان داد (Jingping *et al.*, 2003). اثر زمان رسیدگی بر تغییرات عدد سی‌تی و خواص فیزیکوشیمیایی میوه هلو نشان داد که با پیشرفت زمان رسیدگی میوه، محتوای رطوبت روند کاهشی مشابه با عدد سی‌تی پیدا کرد (Barcelon *et al.*, 1999). نتایج اندازه‌گیری رطوبت سیب در شرایط نگهداری در دماهای ۷، ۱۶ و ۲۵ درجه سلسیوس و در دوره‌های صفر، ۷ و ۱۴ روز نشان داد که در دمای ۷ درجه سلسیوس، رطوبت سیب به‌ترتیب به مقادیر ۸۶/۰۴، ۸۵/۲۲ و ۸۰/۵۶ درصد رسید. این رطوبت در دمای نگهداری ۱۶ درجه سلسیوس و در دوره نگهداری صفر، ۷ و ۱۴ روز به‌ترتیب ۸۵/۰۶، ۸۲/۵۱ و ۸۲/۴۲ درصد به‌دست آمد. در دمای ۲۵ درجه سلسیوس میزان رطوبت در دوره نگهداری صفر، ۷ و ۱۴ روز به‌ترتیب ۸۵/۰۳، ۷۶/۸۰ و ۷۴ درصد اندازه‌گیری شد (Khan *et al.*, 2017).



شکل ٤- تغییرات مقدار سفتی سیب برحسب عدد سی‌تی در دمای انبارداری صفر درجه سلسیوس

Fig. 4. Changes in apple flesh firmness in terms of CT number at the storage temperature of 0 degrees Celsius



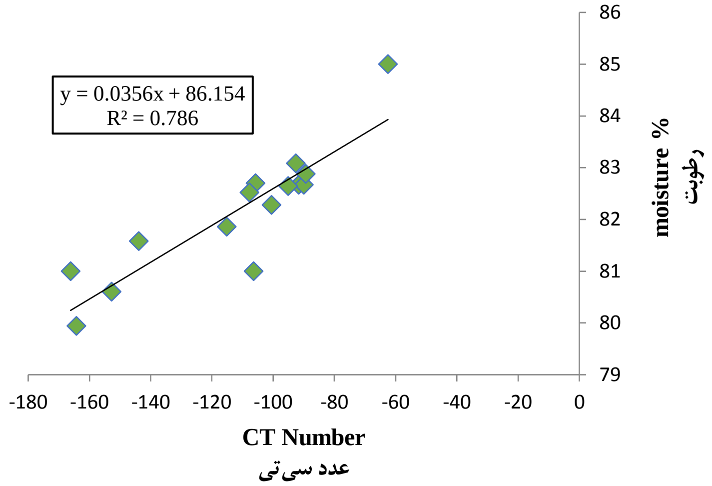
شکل ٥- تغییرات مقدار سفتی سیب برحسب عدد سی‌تی در دمای انبارداری ٤ درجه سلسیوس

Fig. 5. Changes in apple flesh firmness in terms of CT number at the storage temperature of 4 degrees Celsius

تغییرات چگالی میوه سیب طی انبارداری، رابطه خطی مثبت با عدد سی‌تی نشان داد که این روابط در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار و دارای ضریب همبستگی با مقدار ۰/۹۰۴ شد (جدول ۲). نتایج شکل ۸ و شکل ۹ نشان می‌دهد که در دمای نگهداری صفر و ۴ درجه سلسیوس تغییرات چگالی میوه را می‌توان با ضرایب تبیین (R^2) به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۴ پیش‌بینی نمود. همسو بودن کاهش عدد سی‌تی (به سمت منفی) و چگالی میوه احتمالاً می‌تواند ناشی از وجود فضای خالی، محتوای رطوبت کمتر و بافت میوه با چگالی کمتر در اثر گذر زمان رسیدگی و انبارداری باشد (Barcelon *et al.*, 1999).

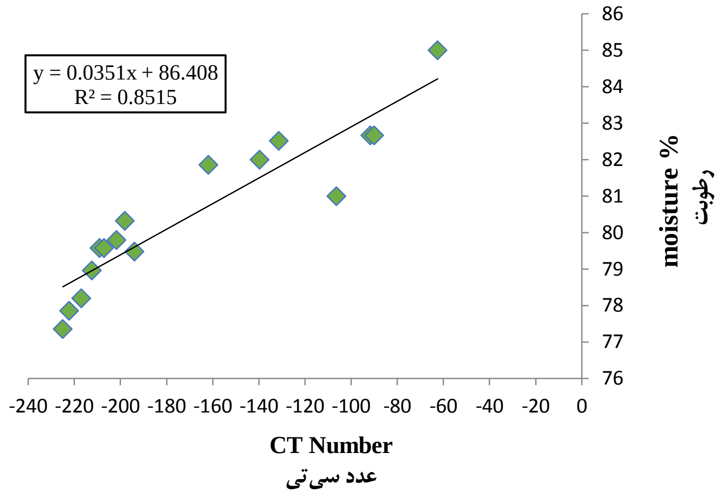
چگالی از جمله خصوصیات میوه است که تحت تأثیر صفات ذاتی و نیز شرایط نگهداری میوه می‌باشد. از جمله عوامل تغییر چگالی میوه، تغییرات وزن آن است. شرایط نگهداری شامل دما و مدت زمان نگهداری سیب می‌تواند کاهش وزن میوه و درنتیجه کاهش چگالی آن را به همراه داشته باشد. طبق تحقیقات صورت گرفته، میوه پس از برداشت همچنان آب خود را از دست می‌دهد و درنتیجه کاهش وزن افزایش می‌یابد (Al- Obeed & Harhash, 2006). طبق نتایج تحقیقی همبستگی مثبت بین عدد سی‌تی و چگالی میوه انبه به‌دست آمد (Barcelon *et al.*, 1999).

طبق نتایج جدول ۲ بین عدد سی‌تی و مقدار مواد جامد محلول رابطه خطی منفی با ضریب همبستگی ۰/۸۳۰- برقرار است که در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. شکل ۱۰ و شکل ۱۱ تغییرات مقدار مواد جامد محلول سیب برحسب عدد سی‌تی در دو دمای صفر و ۴ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. ضریب تبیین (R^2) در رگرسیون خطی در این دو دما به‌ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۶۲ به‌دست آمد. بر این اساس تغییرات میزان مواد جامد محلول سیب در طول انبارداری در دمای صفر درجه نسبت به ۴ درجه دمای سلسیوس با تغییرات عدد سی‌تی کمی همسوتر بوده است و با ضریب اطمینان بیشتری می‌توان تغییرات مواد جامد محلول را از روی اعداد سی‌تی تخمین زد. میزان مواد جامد محلول یکی از شاخص‌های اصلی رسیدگی میوه‌ها به شمار می‌آید. افزایش مواد جامد محلول به‌دلیل تبدیل نشاسته به قندهای محلول رخ می‌دهد. نشاسته از ترکیبات ذخیره‌ای سیب به شمار می‌آید که طی رشد میوه انباشته می‌شود و تجزیه آن پیش از بلوغ میوه، منبع عمده قندهای میوه است که منجر به شیرینی میوه می‌شود (Hadian-Deljou & Sarikhani, 2013).



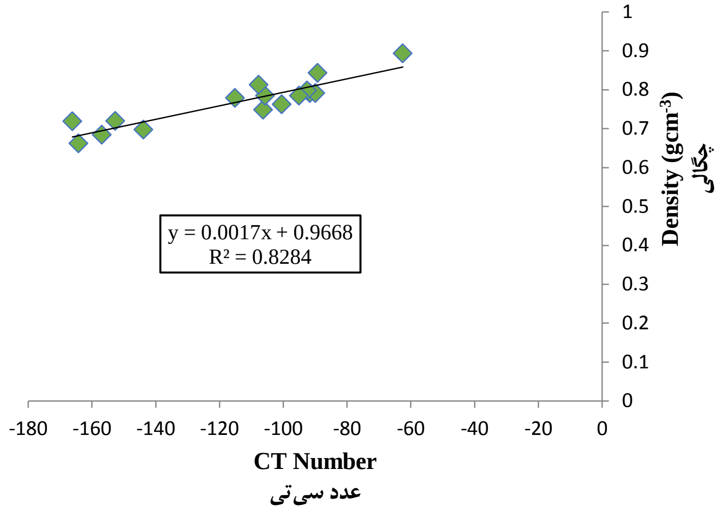
شکل ٦- تغییرات مقدار رطوبت سیب برحسب عدد سی‌تی در دمای انبارداری صفر درجه سلسیوس

Fig. 6. Changes in apple moisture in terms of CT number at the storage temperature of 0 degrees Celsius



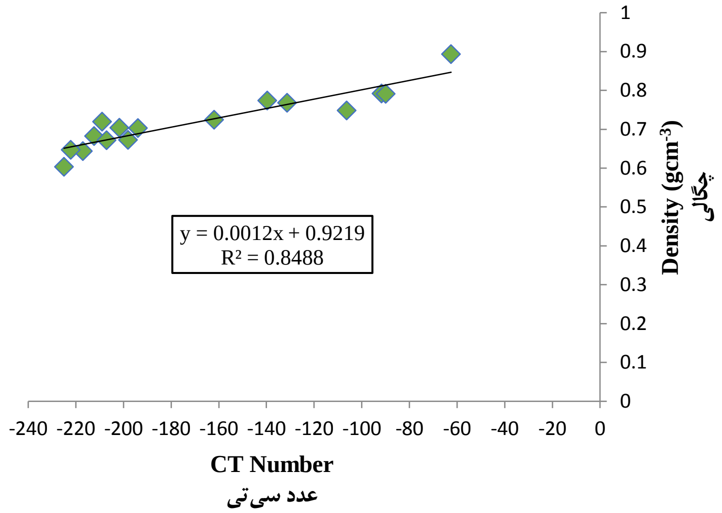
شکل ۷- تغییرات مقدار رطوبت سیب برحسب عدد سی‌تی در دمای انبارداری ٤ درجه سلسیوس

Fig. 7. Changes in apple moisture in terms of CT number at the storage temperature of 4 degrees Celsius



شکل ۸- تغییرات مقدار چگالی سیب برحسب عدد سی‌تی در دمای انبارداری صفر درجه سلسیوس

Fig. 8. Changes in apple density in terms of CT number at the storage temperature of 0 degrees Celsius

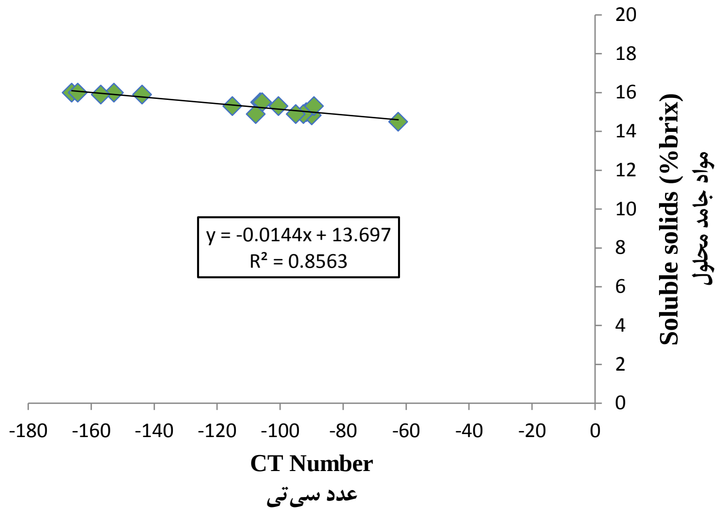


شکل ۹- تغییرات مقدار چگالی سیب برحسب عدد سی‌تی در دمای انبارداری صفر درجه سلسیوس

Fig. 9. Changes in apple density in terms of CT number at the storage temperature of 4 degrees Celsius

نتایج تحقیقی نشان داد که میزان مواد جامد محلول طی دوره انبارداری سیب باگذشت زمان، ۱۳/۹ درصد افزایش یافته است (Mohammadpour *et al.*, 2022). تحقیقات دیگران نیز همبستگی معکوس بین اعداد سی‌تی به‌دست آمده در پردازش تصاویر اشعه ایکس و مقدار مواد جامد حلال در محصول انبه را نشان داد (Barcelon *et al.*, 1999). همچنین محققان اظهار کردند که با نزدیک شدن به زمان رسیدگی میوه انبه، عدد سی‌تی کاهش و محتوای مواد جامد محلول میوه افزایش یافت (Kotwaliwale *et al.*, 2012).

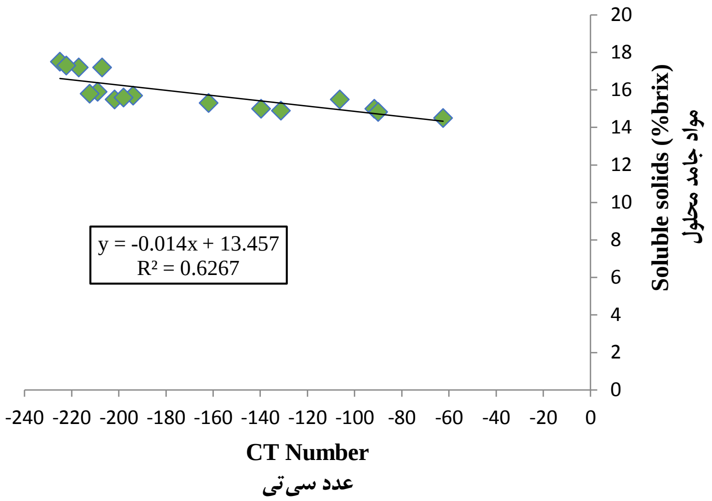
در جدول ۴ خلاصه‌ای از مقایسه ضریب تبیین (R^2) ارتباط عدد سی‌تی و خصوصیات کیفی برخی مواد غذایی نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد استفاده از تکنیک تصویربرداری اشعه ایکس و استخراج خصوصیات کیفی مواد غذایی از آن، روش مناسبی برای پیش‌بینی این خصوصیات است.



شکل ۱۰- تغییرات مقدار مواد جامد محلول برحسب عدد سی‌تی در دمای انبارداری صفر درجه سلسیوس
Fig. 10. Changes in soluble solids in terms of CT number at the storage temperature of 0 degrees Celsius

جدول ٤- ضریب تبیین ارتباط عدد سی‌تی و خصوصیات کیفی برخی مواد غذایی
Table 4- Coefficient determination of the relationship between CT number and quality characteristics of some food items

مرجع Reference	ضریب تبیین (R^2) Coefficient determination	خصوصیت کیفی Qualitative characteristic	نوع ماده غذایی Type of food
Haseth *et al.*, 2007	0.97	مقدار نمک Salt	گوشت Meat
Mousavi *et al.*, 2007	0.87	کریستال‌های یخ در زمان انجماد Ice crystals during freezing	گوشت-ماهی-سیب زمینی-هویج Meat-fish-potato-carrot
Salmanizade *et al.*, 2013	0.9<	اسیدیته قابل تیتراسیون، میزان آنتوسیانین‌ها، pH و مواد جامد محلول Titratable acidity, anthocyanins, pH and soluble solids	انار Pomegranate
Chigwaya *et al.*, 2021	0.76-0.99	قهوه‌ای شدن داخلی Internal browning	سیب Apple
Jingping *et al.*, 2003	0.64	رطوبت Moisture	سیب Apple
تحقیق حاضر Present research	0.55-0.75	pH	سیب Apple
تحقیق حاضر Present research	0.32-0.57	سفتی Firmness	سیب Apple
تحقیق حاضر Present research	0.78-0.85	رطوبت Moisture	سیب Apple
تحقیق حاضر Present research	0.82-0.84	چگالی Density	سیب Apple
تحقیق حاضر Present research	0.62-0.85	مواد جامد محلول Soluble solids	سیب Apple



شکل ۱۱- تغییرات مقدار مواد جامد محلول برحسب عدد سی‌تی در دمای انبارداری ٤ درجه سلسیوس

Fig. 11. Changes in soluble solids in terms of CT number at the storage temperature of 4 degrees Celsius

نتیجه‌گیری

محصول سیب از جمله میوه‌هایی است که برای مدت زمان نسبتاً طولانی در شرایط انبارداری نگهداری می‌شود. تغییرات فیزیولوژیکی ایجاد شده در محصول، موجب تغییر در خصوصیات کیفی میوه شده و ارزیابی‌های کیفی و انتخاب شرایط مناسب برای نگهداری را ضروری می‌سازد. تحقیق حاضر باهدف امکان استفاده از روابط احتمالی بین عدد سی‌تی حاصل از تصویربرداری با اشعه ایکس و خواص فیزیکوشیمیایی سیب رقم گلدن دلیشز انجام شد. نتایج نشان داد که عدد سی‌تی با میزان pH و مواد جامد محلول رابطه خطی منفی و با خواص سفتی سیب، رطوبت و چگالی میوه رابطه خطی مثبت دارد. بر این اساس در دو دمای انبارداری صفر و ۴ درجه سلسیوس، ضرایب تبیین (R^2) به دست آمده از مدل رگرسیون خطی، برای ارتباط عدد سی‌تی با میزان pH ۰/۷۵و ۰/۵۵، سفتی سیب ۰/۳۲ و ۰/۵۷، رطوبت ۰/۷۸ و ۰/۸۵، چگالی میوه ۰/۸۲ و ۰/۸۴ و مواد جامد محلول ۰/۸۵ و ۰/۶۲ به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که با تقریب مناسبی می‌توان از آزمون غیر مخرب تصویربرداری اشعه ایکس در تعیین برخی خواص کیفی محصول سیب که در قیمت‌گذاری و ارزش اقتصادی آن مهم است، استفاده کرد.

میزان مشارکت

بهشاد طحانی: جمع‌آوری داده‌ها، تحقیق و بررسی، **بابک بهشتی:** روش‌شناسی، مدیریت تحقیق، **محسن حیدری سلطان‌آبادی:** نرم‌افزار، نظارت، **احسان حکمتیان:** نرم‌افزار.

منابع تأمین مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نکرد.

References

1. Al- Obeed, R.S., & Harhash, M.M. (2006). Impact of postharvest treatments on storage life and quality of "Mixican" Lime. *Journal of Advanced Agricultural Technologies*, *11*(3), 533-549.
2. Anon. (2004). Fruits and vegetable products – determination of soluble solids content–refractometeric method. International Standard 217.
3. Anon. (2023). Agricultural statistics. The third volume: Report on garden, mushroom and greenhouse products. Ministry of Agricultural Jihad, Center for Statistics, Information and Communication Technology.
4. AOAC .(1999). Official Methods of Analysis. 16th Edition, 5th Revision, Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
5. AOAC. (2005). Association of Analytical Chemists. Method 923.03. In: Official Methods of Analysis, 21st Edition, AOAC International Publisher and Gaithersburg.
6. Azadshahraki, F., & Kafashan, J. (2016). Quality indicators of garden products and their measurement methods. Agricultural Engineering Research Institute. Knowledge Network and Promotional Media Office. Publication of Agricultural Education. Iran. 24 p.

7. Barcelon, E.G., Tojo, S., & Watanabe, K. (1999). X-ray computed tomography for internal quality evaluation of peaches. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *73*(4), 323-330. https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0409
8. Barcelon, E.G., Tojo, S., & Watanabe, K. (1999). X-ray absorption and some quality characteristics of mango fruit (*Mangifera indica* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *47*(9), 3822-5. https://doi.org/10.1021/jf980690e
9. Chigwaya, K., Karuppanapandian, T., Schoeman, L., Viljoen, D.W., Crouch, I.J., Nugraha, B., Verboven, P., Nicolaï, B.M., & Crouch, E.M. (2021). X-ray CT and porosity mapping to determine the effect of 'Fuji' apple morphological and microstructural properties on the incidence of CO_2 induced internal browning. *Postharvest Biology and Technology*, *174*, 111464. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111464
10. Diels, E., Van Dael, M., Keresztes, J., Vanmaercke, S., Verboven, P., Nicolai, B., Saeys, W., Ramon, H., & Smeets, B. (2017). Assessment of bruise volumes in apples using X-ray computed tomography. *Postharvest Biology and Technology*, *128*, 24-32. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.013
11. Hadian-Deljou, M., & Sarikhani, H. (2013). Effect of salicylic acid on maintaining post-harvest quality of apple cv. ‹Golabe-Kohanz. *Journal of Crops Improvement*, *14*(2), 71-82. https://doi.org/10.22059/jci.2013.29502
12. Haseth, T.T., Egelandsdal, B., Bjerke, F., & Sorheim, O. (2007). Computed tomography for quantitative determination of sodium chloride in ground pork and dry cured hams. *Journal of food science*, *72*(8), 420-427. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00492.x
13. Jamshidi, B., Arefi, A., & Minaei, S. (2017). Non-destructive prediction of apple firmness during storage based on dynamic speckle patterns. *Journal of Agricultural Machinery*, *7*(1), 140-151. https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.49413
14. Jarolmasjed, S., Espinoza, C.Z., Sankaran, S., & Khot, L.R. (2016). Postharvest bitter pit detection and progression evaluation in 'Honeycrisp' apples using computed tomography images. *Postharvest Biology and Technology*, *118*, 35-42. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.03.014
15. Jingping, Z., Zheng, P., & Jian,W. (2003). Correlation between moisture of apples and values of CT[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, *19*(2), 180-182.
16. Khan, B., Syed Zulfiqar, A., Shahzad, S., Basharat, M., Ali, J., Jabeen, Z., Waris, M., & Fahmid, S. (2017). Postharvest quality of apple (*Malus domestica* Borkh) as influenced by storage conditions. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, *4*(7), 154-163. https://doi.org/10.22192/ijarbs.2017.04.07.019
17. Kotwaliwale, N., Kalne, A., & Singh, K. (2012). *Monitoring of mango (Mangifera indica L.) (Cv.: Chousa) ripening using X-ray computed tomography*, 2012 Sixth International Conference on Sensing Technology (ICST), Kolkata, India, 2012, pp. 326-330. https://doi.org/10.1109/ICSensT.2012.6461696
18. Kotwaliwale, N., Singh, K., Kalne, A., Jha, S.N., Seth, N., & Kar, A. (2014). X-ray imaging methods for internal quality evaluation of agricultural produce. *Journal of Food Science and Technology*, *51*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0485-y
19. Mohammadpour, H., Selahvarzi, Y., Oraee, A., & Tehranifar, A. (2022). Evaluation of rootstock and scion interactions on apple storage characteristics (*Malus domestica* Borkh). *Plant Process and Function*, *11*(48), 4.
20. Mousavi, R., Miri, T., Cox, P.W., & Fryer, P. (2007). Imaging food freezing using X-ray microtomography. *International Journal of Food Science and Technology*, *42*, 714-727. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01514.x
21. Salmanizade, F., Nassiri, S., rahemi, M., & Jafari, A. (2013). Feasibility study of X-ray absorption application as a non-destructive method for determining some qualitative parameters of pomegranate fruit. *Journal of Horticultural Science*, *27*(3), 335-341. https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.26391
22. Vicent, V., Verboven, P., Ndoye, F.T., Alvarez, G., & Nicolaï, B. (2017). A new method developed to characterize the 3D microstructure of frozen apple using X-ray micro-CT. *Journal of Food Engineering*, *212*, 154-164. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.028